



Simulation numérique de l'amerrissage d'hélicoptère

S. Halbout, F. Audier, Olivier Kimmoun, Nicolas Malleron, Fabien Remy,
Yves-Marie Scolan

► To cite this version:

S. Halbout, F. Audier, Olivier Kimmoun, Nicolas Malleron, Fabien Remy, et al.. Simulation numérique de l'amerrissage d'hélicoptère. 19 ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. pp.n° 514. hal-00458554

HAL Id: hal-00458554

<https://hal.science/hal-00458554>

Submitted on 21 Feb 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Impact de structures gonflées sur un liquide au repos

S. HALBOUT^{a,b}, F. AUDIER^b, O. KIMMOUN^a, N. MALLERON^{a,b}, F. REMY^a, Y.-M. SCOLAN^a

a. Ecole Centrale Marseille - IRPHE, 38 Rue Joliot-Curie, 13451 Marseille cedex 20 (FRANCE)

b. Eurocopter, Aéroport International de Marseille-Provence, 13725 Marignane (FRANCE)

Résumé :

Cette étude porte sur l'interaction fluide-structure se produisant lors de l'impact hydrodynamique d'un corps souple et gonflé sur un liquide au repos. L'objectif industriel est de mieux modéliser le comportement de systèmes de flottabilités gonflés lors de l'amerrissage d'hélicoptères. Une campagne expérimentale ainsi que des simulations numériques sont menées. Des comparaisons modèle numérique - expériences sont réalisées pour les premiers instants de pénétration.

Abstract :

This study deals with the fluid-structure interaction of an inflated deformable body during its impact on a free surface initially at rest. The industrial aim is to better understand and model the floatation system behaviour during the helicopter sealanding. An experimental campaign and a numerical modeling are led. Comparisons between the numerical model and the experimental data are done for the initial stage of impact.

Mots clefs : impact hydrodynamique, modèle de Wagner linéarisé axisymétrique, couplage fluide structure, modes normaux d'une structure déformable

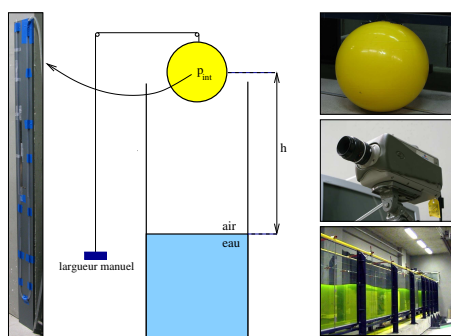
1 Introduction

L'impact hydrodynamique est un problème couramment rencontré dans les domaines de l'architecture navale et dans le dimensionnement des structures offshore. Pourtant, les premières études théoriques ont porté sur l'amerrissage d'aéronefs. Les fondements du problème d'impact hydrodynamique en théorie potentielle ont été posés par Karman (1929) [1] et Wagner (1932) [2]. Dans le cas de l'amerrissage d'hélicoptères, on doit prendre en compte la présence de flotteurs. Ceux-ci sont en fait des structures gonflables, dont la rigidité est complètement liée à la pression interne imposée. Le matériau quasi-inextensible les constituant est un tissu ayant subi une enduction élastomérique. Il est difficile de réaliser une maquette à échelle réduite présentant des caractéristiques mécaniques équivalentes aux systèmes de flottabilité. On utilise donc des ballons gonflables, type ballons sauteurs, pour effectuer des essais d'impacts hydroélastiques. Des mesures qualitatives ont permis d'identifier les caractéristiques du phénomène.

Ce résumé présente les grandes lignes de la campagne expérimentale et de l'analyse des essais. Un modèle numérique est comparé aux résultats expérimentaux lors des premiers instants de la pénétration.

2 Campagne Expérimentale

2.1 Principe du montage - Instrumentation



Une campagne expérimentale a été menée en avril 2008 dans le canal à houle au sein du canal de l'Ecole Centrale de Marseille. Elle consiste en des lâchers de ballon sur une surface libre au repos. On les filme avec une caméra dotée d'une haute fréquence d'acquisition f_e . La figure 1 illustre le montage utilisé lors de cette campagne et montre les différents éléments qu'il comporte : manomètre, bassin, ballon sauteur et caméra.

Lors des essais $f_e = 1900$ images/seconde. L'analyse des images fournit des données de

FIG. 1 – Instrumentation expérimentale et schéma de principe de la campagne dans le canal de l'Ecole Centrale de Marseille

cinématique et permet de quantifier l'importance des phénomènes. La pression interne p_{int} et la hauteur de chute h sont les principaux paramètres d'essai.

2.2 Analyse des essais

2.2.1 Comparaison rigide / liquide

La figure 2 compare un impact élastique sur une surface rigide et un impact hydro-élastique dans des conditions similaires : même hauteur de chute et même pression interne du ballon. Le temps $t = 0$ correspond à l'instant de contact initial. On repère le centre de gravité du ballon à partir de sa forme avant impact, *i.e.* lors de la chute libre dans l'air. Après impact on suppose le centre de gravité cdg confondu avec le centre du diamètre horizontal du ballon. Dans la suite on s'intéresse à la cinématique de ce point. On observe également la déflexion w de la membrane par rapport à la forme initiale au point le plus bas du ballon, appelé apex (c.f. figure 2, 2)).

On peut observer, pour un essai donné, deux phases distinctes. Dans un premier temps, alors que le cdg est en mouvement vers le bas la déflexion correspond à un écrasement du ballon. C'est la phase d'impact. Ensuite le cdg stagne verticalement alors que la déflexion traduit l'oscillation de l'apex. L'ordre de grandeur des durées des différentes phases est mesurable. Suivant les variations des paramètres le temps d'impact est compris entre 5 et 17 *ms*. La phase d'oscillation débute immédiatement après l'impact et peut durer jusqu'à 277 *ms*.

La figure 2 présente des images correspondant à des instants caractéristiques. Ils sont portées sur la même échelle de temps (0, 45 *s*) que les cinématiques de l'apex, du centre de gravité et de la déflexion w à l'apex. Au-delà de 0.015 *ms* les cinématiques des impacts sont différentes.

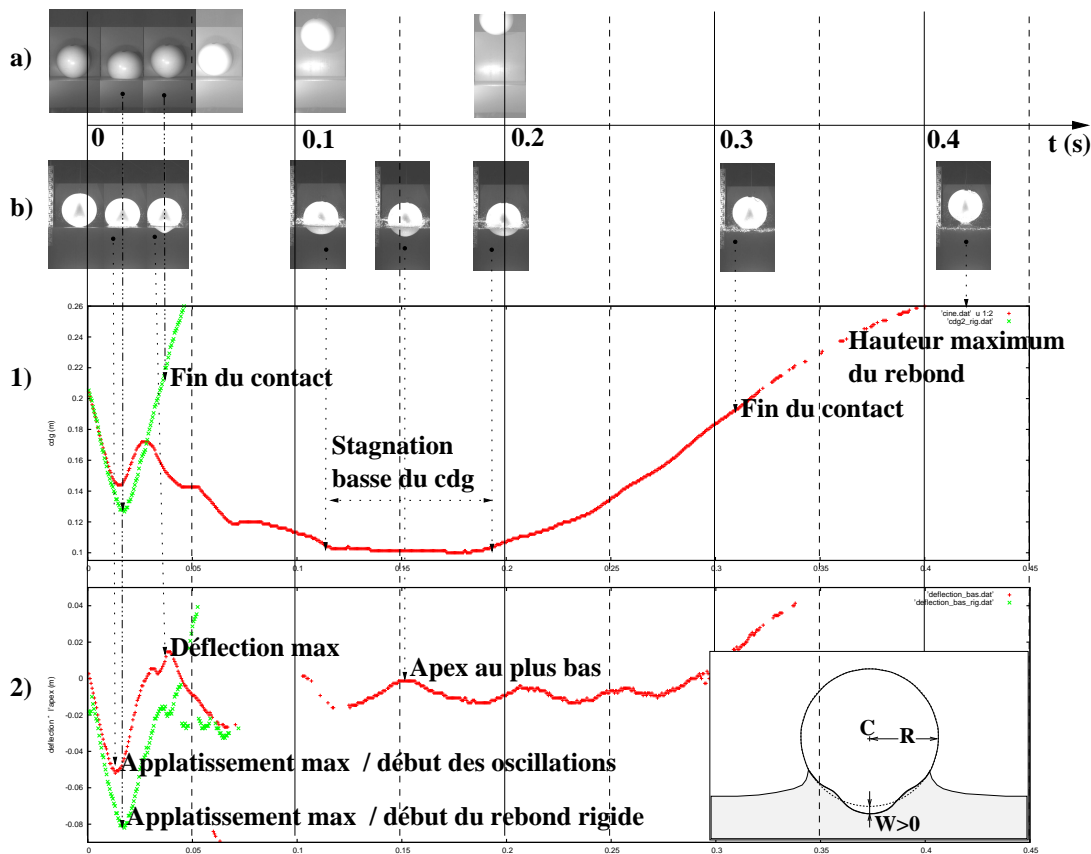


FIG. 2 – Comparaison, au cours du temps, d'un impact élastique sur une surface rigide et sur une surface fluide au repos. a) photos d'instant caractéristiques cas d'une surface rigide ; b) photos d'instant caractéristiques cas d'une surface fluide ; 1) position du centre de gravité du ballon au cours du temps (rigide : points verts, liquide : points rouges) ; 2) déflexions à l'apex (cas rigide : points verts, cas liquide : points rouges)

2.2.2 Etude paramétrique

Pour une hauteur de chute fixe, l'amplitude de la déflexion diminue quand la pression interne du ballon augmente (c.f. figure 3 gauche). La phase d'oscillation débute après le maximum de déflexion. Cette seconde phase est d'autant plus remarquable que la pression interne est faible.

Pour une pression interne donnée, l'amplitude de la déflexion augmente quand la hauteur de chute augmente (c.f. figure 3 droite). On remarque également que la fréquence des oscillations reste constante.

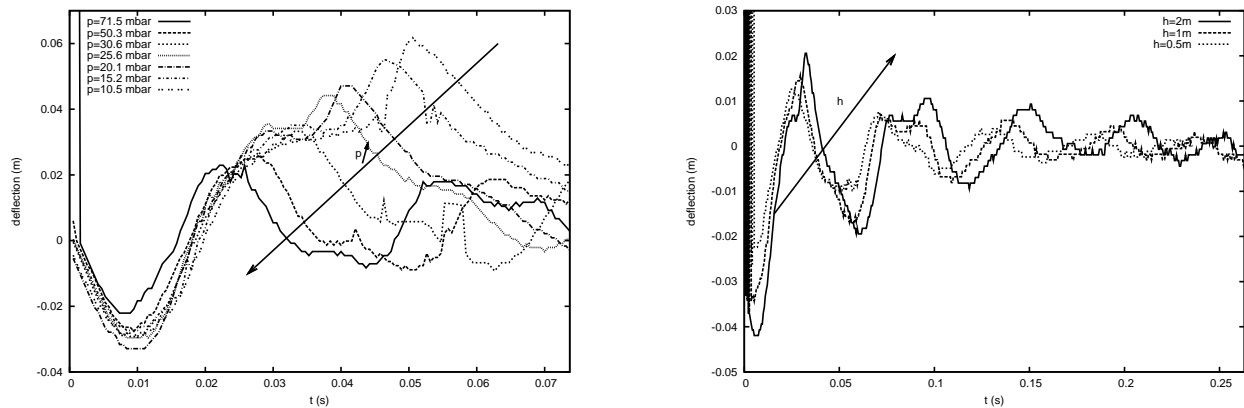


FIG. 3 – Mesure de la déflexion w en mètres en fonction du temps pour 7 pressions internes différentes (gauche) et 4 hauteurs de chute (droite). $f_e = 1900$ images/seconde

2.2.3 Evaluation des erreurs de mesure

Parmi les erreurs de mesure il y a par exemple le repérage et le suivi des contours. L'erreur faite sur la mesure du rayon est de l'ordre du demi-millimètre avec ce problème de parallaxe. Le phénomène de diffraction à la surface de l'eau induit également une erreur sur la détection de la pénétration réelle du ballon. Des essais sur la position en hauteur et inclinaison de la caméra ont permis de réduire au maximum ces erreurs. Un autre problème est le suivi de l'apex. En effet pour des pressions inférieures ou égales à 25 mBar ce point est caché sur certaines images.

La détection des contours se fait à l'aide de fonctions calculant les différences de contraste. L'ensemble de points résultant permet de définir des splines représentant au mieux la forme de la surface du ballon. En zoomant jusqu'au pixel sur ces courbes, on s'aperçoit que celles-ci peuvent ajuster de façon plus ou moins précise le ballon. Il en résulte une erreur sur le rayon qui est au plus de cinq pixels. Soit un écart maximum de 6,25 mm.

Lors de l'exploitation des mesures des cinématiques des différents points remarquables seule la vitesse du centre de gravité est filtrée.

3 Analyse dimensionnelle

Les caractéristiques des ballons utilisés sont les suivantes : Module d'Young : $E = 302 \text{ MPa}$, coefficient de Poisson : $\nu = 0.31$, densité $\rho_s = 1060 \text{ Kg/m}^3$, épaisseur moyenne $e = 1.1 \text{ mm}$.

Le tableau 1 donne les ordres de grandeur de trois nombres adimensionnels calculés pour les données précédentes : le nombre d'Euler, le nombre de Cauchy et la Vitesse réduite.

Nombres caractéristiques	Phase initiale	Phase d'oscillation
Nombre d'Euler : $p_{int}/\rho V_f^2$	$O(10^{-3})$	$O(1)$
Nombre de Cauchy : $\rho V_f^2/E$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-6})$
Vitesse réduite : V_f/V_s	$O(1)$	$O(10^{-2})$

TAB. 1 – Ordre de grandeur des trois nombres adimensionnels mis en évidence dans l'analyse dimensionnelle

Le nombre d'Euler compare la contrainte dans le fluide avec la 'précontrainte' induite par la pression dans le ballon. Durant la phase d'impact, le fluide a une action prépondérante, alors qu'au cours des oscillations, les contraintes dynamiques du liquide et du gaz s'équilibrent.

Le nombre de Cauchy est le rapport des contraintes dynamiques dans le fluide sur les contraintes dans la structure. Lors des premiers instants il y a donc un couplage fort entre le fluide et la structure. Ce phénomène s'atténue considérablement lors des oscillations.

On prend V_f , la vitesse caractéristique du fluide, égale à la vitesse d'expansion de la surface mouillée. Elle tend à s'annuler durant les oscillations. $V_s = \sqrt{(E/\rho_s)} \sim 500 \text{ m/s}$ est la vitesse caractéristique du solide (où ρ_s est la densité du matériau). Elle correspond à la vitesse de propagation d'onde dans le matériau du ballon.

4 Modélisation

Un modèle de type Wagner linéarisé (1932) [2] est utilisé pour modéliser les phénomènes observés.

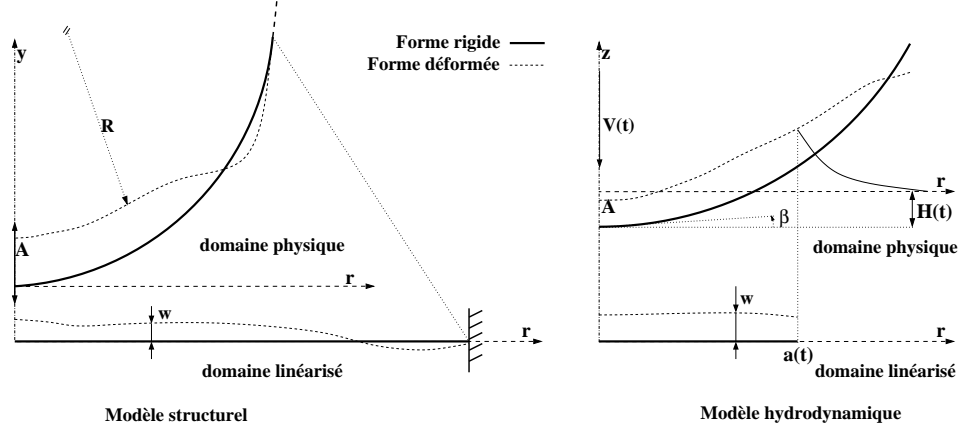


FIG. 4 – Modélisation de l'impact : couplage d'un modèle structurel de coque mince et d'un modèle de type Wagner linéarisé en axisymétrie

La figure 4 illustre l'approche adoptée. Le modèle couplé hydro-élastique est décrit dans Scolan (2004) [3] pour un cône élastique mais généralisable à n'importe quelle forme. Dans la mesure où l'angle mort β ainsi que la pénétration $H(t)$ restent petits devant le rayon de courbure R de la sphère, cette approche est valide. On linéarise la surface mouillée du corps ainsi que la surface libre, en les projetant sur la surface libre au repos. Le problème s'apparente alors au problème d'un disque plat en expansion dans le fluide.

4.1 Modèle élastique

La déflexion en tout point de la structure est projetée sur la base des modes propres secs d'un disque (c.f. figure 4) :

$$w(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(t) w_n(x, y). \quad (1)$$

où w_n représente la fonction de forme du n-ième mode via des fonctions de Bessel d'ordre zéro et A_n l'amplitude qui lui est associée. Ils sont calculés en imposant les conditions aux frontières : à savoir un encastrement en $r = r_{max}$. Ici $r_{max} = 0,5 \text{ m}$. On vérifie numériquement qu'à partir de $r_{max} = 0,4 \text{ m}$ et au-delà r_{max} n'a pas d'influence sur les solutions.

4.2 Modèle de Wagner linéarisé axisymétrique

Le problème hydrodynamique peut être formulé en terme de potentiel des déplacements ϕ . On suppose en effet que lors des premiers instants d'impact le fluide est incompressible et l'écoulement irrotationnel. Ainsi le problème aux limites s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Delta \phi = 0 & \text{domaine fluide} \\ \phi = 0 & \text{à la surface libre } FS(t) \\ \phi_{,z} = a(t)[-H(t) + f(r) + w(r, t)] & \text{sur la surface mouillée } D(t) \\ \phi \rightarrow 0 & \text{à l'infini} \end{array} \right. \quad (2)$$

$V(t)$ est la vitesse instantanée de pénétration du corps dans le fluide, r est la coordonnée radiale, $a(t)$ est le rayon de la ligne de contact.

On s'intéresse à la solution sous la forme d'une transformée de Hankel. La position de la ligne de contact est obtenue grâce à la condition de Wagner. Cette condition impose que le déplacement vertical du fluide à la ligne de contact est fini. Ce qui conduit à une expression de la position de la ligne de contact donnée par l'équation 4.

$$\varphi(r, a) = -\frac{2V(t)}{\pi} \sqrt{a^2 - r^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{q}_n \Phi_n, \quad \text{avec} \quad \Phi_n = \frac{2r}{\pi} \int_0^{\text{argch}(\frac{a}{r})} \cosh(x) Q_n(r \cosh x) dx, \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n Q_n = \int_0^t V(\tau) d\tau - \frac{a^2}{3R}, \quad \text{avec} \quad Q_n(a) = \int_0^{\pi/2} \sin \theta w_n(a(t) \sin \theta) d\theta \quad (4)$$

Un système différentiel en temps est formulé et résolu pour a et A_n . La loi de Newton ferme le problème.

On se limite à l'étude de l'expansion de la surface mouillée idéalisée comme un cercle décrit par la ligne de contact. On s'affranchit ainsi du problème du jet étudié dans Scolan et Korobkin (2003) [4].

Pour comparer le modèle numérique aux résultats expérimentaux on impose V dans le modèle avec les valeurs issues de l'analyse des images. Le bon contrôle de la cinématique est vérifiable sur la figure 5.

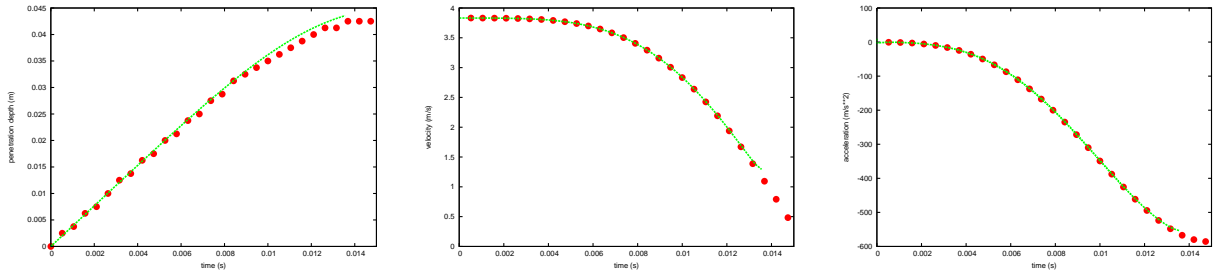


FIG. 5 – Reconstitution numérique (ligne verte) de la cinématique à partir de résultats expérimentaux (points rouges). De gauche à droite : déplacement, vitesse et accélération

Les comparaisons des déformées issues du modèle numérique (ligne continue) et des expériences (points) lors des premiers instants sont visibles sur la figure 6.

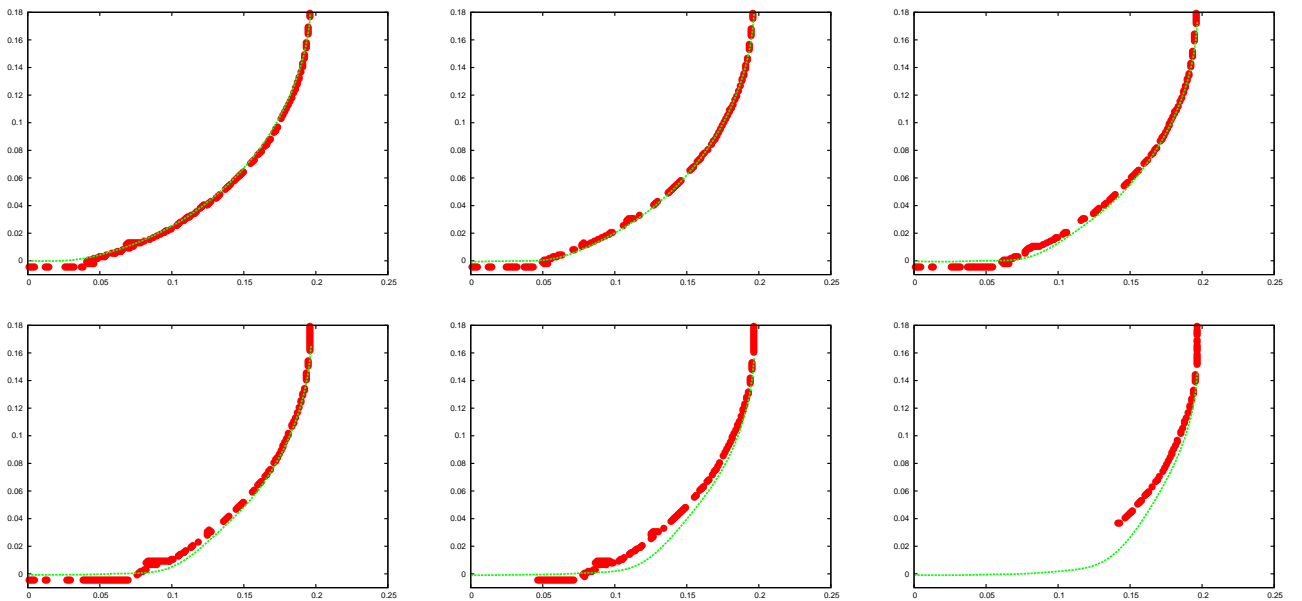


FIG. 6 – Comparaison des déformées issues des résultats expérimentaux (points) et numériques (lignes continues) lors des premiers instants : $t_1 = 0,527 \text{ ms}$, $t_2 = 1,59 \text{ ms}$, $t_3 = 2,65 \text{ ms}$, $t_4 = 3,703 \text{ ms}$, $t_5 = 4,73 \text{ ms}$, $t_6 = 5,81 \text{ ms}$. $h = 1 \text{ m}$

La figure 7 montre l'évolution du rayon de la surface mouillée et sa vitesse d'expansion. A droite, le cas rigide ($da/dt = 3RV/2a$) est comparé à la solution élastique.

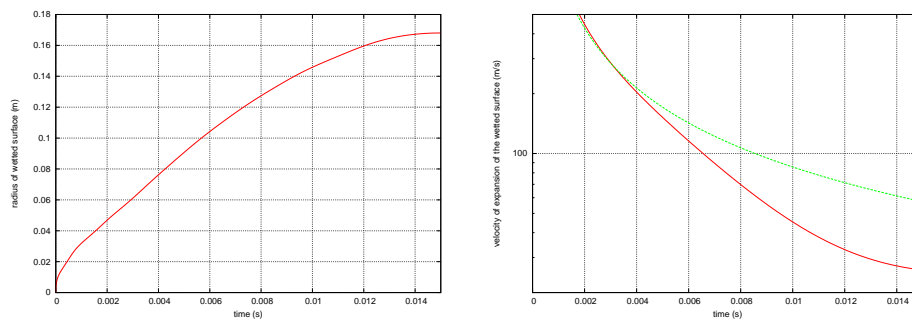


FIG. 7 – Evolution du rayon de la surface mouillée au cours du temps (gauche) et vitesse d'expansion de la surface mouillée (droite) pour une sphère rigide (pointillés) et pour le modèle élastique (ligne continue)

On remarque le comportement singulier de la vitesse da/dt lors des premiers instants de contact. Elle se comporte comme $1/\sqrt{t}$. Or la pression varie comme le carré de la vitesse d'expansion, ce qui rend la prédiction de la distribution de pression quelque peu irréaliste aux premières millisecondes de pénétration.

5 Conclusion et perspectives

On s'intéresse à l'impact en chute libre d'une structure gonflée sur une surface liquide au repos. L'observation qualitative des différentes phases de l'impact est possible grâce aux images enregistrées avec une caméra à haute fréquence d'acquisition. Un traitement des images nous permet d'obtenir des données de référence sur la cinématique globale du phénomène. Après comparaison, il est possible de prédire l'expansion de la surface mouillée et de la déformation du ballon. Cela avec un modèle de type Wagner linéarisé en axisymétrie. L'aplatissement est bien reproduit.

Pour représenter la phase d'oscillations un autre modèle est nécessaire.

Sur la base des travaux effectués les perspectives sont : prendre en compte la variation de pression interne via une loi simple sur la caractéristique du matériaux ; étudier la distribution de pression ; faire une étude énergétique ; proposer un modèle type méthode d'éléments de frontières tridimensionnel (BEM 3D).

Références

- [1] von Karman T. The impact of seaplane floats during landing. NACA Report, TN 321, 1929.
- [2] Wagner H. Über Stoss- und gleitvorgänge an der oberfläche von flüssigkeiten. ZAMM, 12, 1932.
- [3] Scolan Y.-M. Hydroelastic behaviour of a conical shell impacting on a quiescent-free surface of an incompressible liquid. Journal of Sound and Vibration, 177(1-2), 163–203, 2004.
- [4] Scolan Y.-M. and Korobkin A. Energy distribution from vertical impact of a three-dimensional solid body onto the flat free surface of an ideal fluid. Journal of Fluids and Structures, 17(2), 275–286, 2003.